

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД НОРМИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ НАГРУЗОК НА МОСТЫ

В статье излагается вероятностная методика нормирования автомобильных нагрузок на мосты. Основные принципы методики включают моделирование случайной автомобильной нагрузки и пролетных строений, статистический анализ эксплуатационных нагрузок, учет сроков службы мостов, выбор критериев обеспеченности нормативной нагрузки.

В последнее время развернулась широкая дискуссия по вопросам нормирования автомобильных нагрузок на мосты, в том числе с участием одного из авторов этой статьи. При этом выявились три основных подхода к указанной проблеме.

Первый, приверженцем которого является и автор, исходит из того, что расчетная схема нормативной автомобильной нагрузки является обобщением многообразных реальных эксплуатационных нагрузок и поэтому должна быть условной. Основные требования к такой расчетной схеме – адекватность, максимальная простота и однозначность. Эти принципы заложены в принятой в России (СССР) в 1984 г. схеме нормативной автомобильной нагрузки АК (с 1984 г. – А11, с 2008 г. – А14). Схема АК представляет собой комбинацию двухосной тележки с нагрузкой на ось равной 10К кН и распределенной нагрузкой интенсивностью К кН/м и, таким образом, одновременно отражает воздействие местной осевой нагрузки и всей автомобильной колонны. Аналогичные комбинированные схемы приняты практически везде за рубежом, в том числе и в Еврокодах.

Второй подход предполагает полную замену отечественных норм проектирования строительных конструкций, в том числе мостов, Еврокодами. Апологетами этого подхода являются некоторые высокопоставленные чиновники, которые слишком буквально поняли вполне справедливый призыв президента страны использовать, где это необходимо, опыт нормирования Европейского Союза. Все дело в том, что не во всех слу-

чаях такая необходимость присутствует. В частности, нормы автомобильной нагрузки на мосты А14 и Н14 обеспечивают пропуск по мостам без ограничений российских и зарубежных автотранспортных средств с учетом прогнозов их утяжеления на перспективу порядка 80–100 лет.

Третий подход, выдвинутый профессором П.М. Саламахиным, состоит в оценке грузоподъемности мостов как возможности пропуска по ним колонн однородных грузовых автомобилей (может быть, с одним утяжеленным) той или иной массы. Соответственно, предлагается вернуться к схемам колонной нормативной нагрузки, подобным нагрузкам Н18 и Н30, которые использовались в отечественных нормах до 1984 г.

На самом деле при нормировании автомобильных нагрузок на мосты необходимо решать две задачи: выбор схемы и назначение величины нормативной нагрузки. По проблеме выбора схемы, далеко не самой главной, дискуссия зашла в тупик. Аргументы сторон не воспринимаются оппонентами. Поэтому в настоящей статье мы к ней не возвращаемся. Намного важнее обосновать величину нормативной нагрузки. И здесь мы принципиально считаем единственно правильным подход на основе вероятностного анализа эксплуатационных нагрузок и критериев обеспеченности.

Идея такого подхода и алгоритм ее реализации были выдвинуты в начале 70-х гг. прошлого столетия при разработке нагрузки А11 (Васильев А.И. *Исследование временных вертикальных нагрузок*

для нормирования расчета автодорожных мостов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972).

Усовершенствованная методика вероятностного обоснования нормативной автомобильной нагрузки была разработана в последнее время аспирантом МАДИ Нгуен Вьет Фьюнгом (при научном руководстве А.И. Васильева) и использована им для корректировки принятой во Вьетнаме нормативной нагрузки НЛ-93 (нормы АASHTO, США). Ниже следует краткое изложение упомянутой методики.

Основные принципы

Поскольку воздействия на мосты реальных автомобильных нагрузок носят случайный характер, выбор величины нормативной автомобильной нагрузки должен быть сделан на основе статистического анализа этих воздействий и определенных критериев надежности (обеспеченности).

Основные принципы предлагаемой методики состоят в следующем.

Учет сроков службы мостов

В соответствии с методикой расчета мостов по предельным состояниям величина нормативной нагрузки должна учитывать рост реальных автомобильных нагрузок в течение всего срока службы моста. В связи с этим определение сроков службы (Т) мостов является необходимым.

Нормирование сроков службы мостов является ключевым моментом разработки норм проектирования, поскольку все остальные расчетные и конструктивные требования должны, прежде всего, обеспечить безопасную эксплуатацию моста под обрабатываемыми нагрузками в конкретных условиях окружающей среды в течение всего срока его службы. В первую очередь это относится к назначению величины нормативной временной нагрузки.

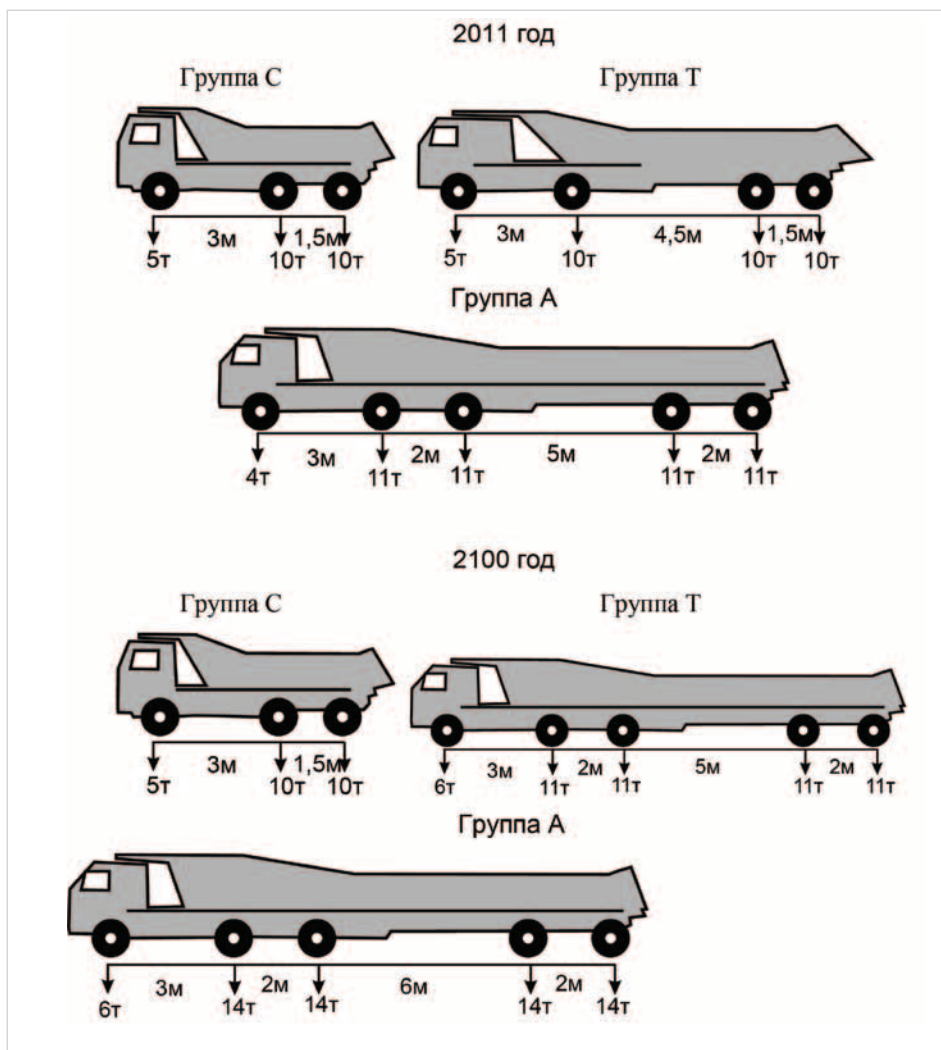


Рис. 1. Схема условных автомобилей (группы С, Т и А) в 2011 и 2100 гг.

В историческом плане сроки службы появились в нормах проектирования относительно недавно. Может быть, впервые в нормативной литературе сроки службы $T = 100$ лет были обозначены в нормах AASHTO (США) в 70-е гг. прошлого столетия. В 90-е гг. такая же норма была принята в Еврокодах. Эти нормативы как бы закрепили сложившееся на базе исторического опыта интуитивное представление о вековом долголетии мостовых сооружений.

В России срок службы мостовых сооружений $T = 100$ лет подразумевался при исчислении амортизационных расходов (1%).

На самом деле нормативный срок службы мостов является технико-экономической категорией, и критерием его оптимизации служит минимум суммарной начальной и эксплуатационной стоимости, приведенной по времени. В этом направлении в недавнем времени исследования про-

водились В.И. Шестериковым и одним из авторов статьи. В.И. Шестериков анализирует процесс физического износа моста и эксплуатационные затраты на его рациональное содержание. Методика А.И. Васильева исходит из учета морального износа несущих конструкций пролетных строений моста и сроков их замены. Критерием оптимизации является минимум суммарной начальной стоимости и стоимости замен морально устаревших пролетных строений в течение срока службы мостового перехода, с приведением ее во времени.

Оба подхода дали практически близкие результаты – 70–90 лет. На основе упомянутых работ были в свое время подготовлены предложения по нормативному сроку службы пролетных строений – 90 лет.

Вероятностная модель автомобильной нагрузки

Исследовать все многообразие автотранспортных средств и их воздействий

на мосты практически невозможно. Поэтому необходимо формализовать эту процедуру.

Все автотранспортные средства подразделяются на три группы в зависимости от общей массы и числа осей (С, Т, А), и для каждой группы формируется схема обобщенного условного автомобиля или автопоезда на настоящий момент и с учетом прогнозов на перспективу (рис. 1).

Из этих условных автомобилей составляются случайные колонны.

Вероятность появления на мосту той или иной автомобильной колонны определяется следующими случайными факторами:

- числом автомобилей в колонне – n ;
- ее структурным составом (соотношение численности групп $C:T:A = i:j:k$).

Расстояние между соседними автомобилями в колонне можно жестко привязать к конкретному типу условного автомобиля. Считая указанные выше случайные факторы независимыми, получаем вероятность конкретной колонны, состоящей из n автомобилей и имеющей в своем составе i автомобилей типа С, j автомобилей типа Т и k автопоездов типа А:

$$P(n, i:j:k) = P(n) * P(C_{i,j,k}^n), \quad (1)$$

где $P(n)$ – вероятность появления колонны из n автомобилей, принимается по данным наблюдений; $P(C_{i,j,k}^n)$ – вероятность сочетания i автомобилей типа С, j автомобилей типа Т и k автопоездов типа А в составе колонны из n автомобилей ($i+j+k=n$).

Значение $P(C_{i,j,k}^n)$ определяется по формуле:

$$P(\tilde{N}_{i,j,k}^n) = \frac{n!}{i! * j! * k!} P_c^i * P_o^j * P_a^k \quad (2)$$

где P_c, P_o, P_a – вероятности появления в колонне соответственно автомобиля группы С, Т или А.

Вероятностная модель автомобильной нагрузки строится как для условий автомобильного движения на сегодняшний день, так и на перспективу в соответствии со сроком службы мостов Т.

Распределение вероятностей усилий в несущих элементах мостов от автомобильных нагрузок

Для анализа усилий, возникающих в несущих элементах моста, целесообразно использовать обобщенные расчетные модели, достаточно полно отражающие работу мостовых конструкций под нагрузкой. В качестве таких моделей наиболее подходят поверхности влияния усилий в характерных сечениях, которые можно интерпретировать системой линий влияния и коэффициентов поперечной установки.

Аналогичный подход был, по-видимому, впервые применен в 1973 г. при обосновании нагрузки А11.

Несущие элементы разной длины характеризуются линиями влияния изгибающих моментов в серединах пролетов и для неразрезных пролетных строений – в надпорных сечениях, а также поперечных сил вблизи опорных сечений. Пространственная работа моделируется соотношениями коэффициентов поперечной установки от двух полос нагрузки $k_1:k_2$. Эти соотношения приняты в трех вариантах: 1:0; 1:0,5; 1:1, и таким образом охватывают практически все реальные случаи пространственной работы пролетных строений автодорожных мостов.

Загружение линий влияния производится по специальной программе «Залив», составленной Нгуен Вьет Фьонгом совместно с канд. техн. наук М.Л. Хазановым. Перебираются все варианты случайных колонн. В результате каждого нагружения определяется усилие и его вероятность. Результаты заносятся в гистограмму «усилие – вероятность». Вероятности усилий, находящихся в одном и том же интервале гистограммы, суммируются. Аналогичные гистограммы строятся для других полос нагрузки, и затем строятся гистограммы суммарных усилий. На основе результирующей гистограммы строится функция распределения вероятностей усилий от нагружения случайными автомобильными колоннами данной поверхности влияния.

Критерии выбора величины нормативной нагрузки

Критериями выбора величины нормативной автомобильной нагрузки служат значения надежности (обеспеченности), которая принимается как убывающая функция времени. Значения этой функ-

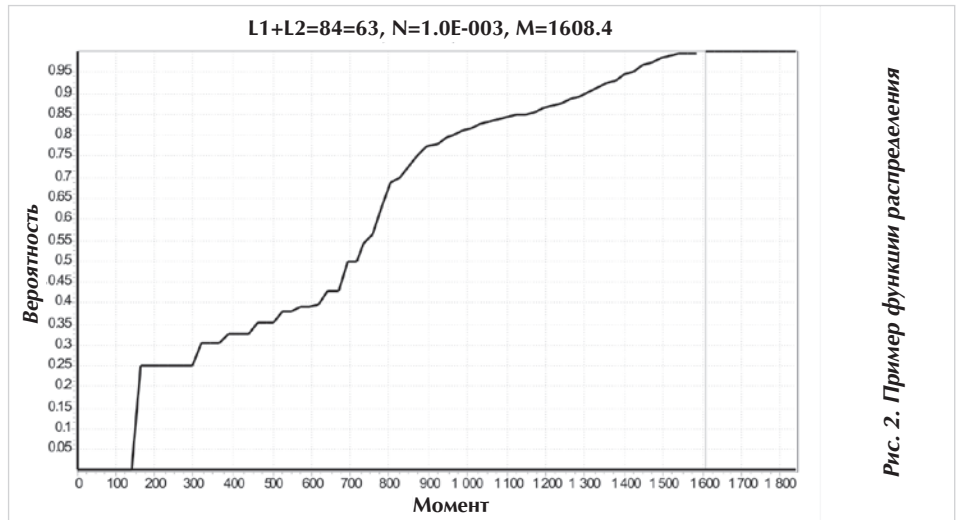


Рис. 2. Пример функции распределения

ции на начальный и завершающий периоды эксплуатации моста задаются исходя из имеющегося опыта.

Указанные критерии можно вывести, например, из следующих рассуждений.

Для мостов, запроектированных по методу допускаемых напряжений, используя нижнюю оценку вероятности отказа, Н.С. Стрелецкий ввел понятие *гарантии неразрушимости*. По существовавшим в 30–40-е гг. прошлого века нормам эта величина составила $\Gamma = 1-(10^{-7}/10^{-8})$.

При переходе на расчет по предельным состояниям запасы несущей способности корректируются в сторону уменьшения – ориентировочно до $\Gamma = 1-(10^{-5}/10^{-6})$. При этом за счет разделения коэффициента запаса обеспеченность расчетных значений нагрузки на момент начала эксплуатации может быть оценена величиной $P_{p,S}(t=0) = 0,9999$, а расчетных сопротивлений материалов – $P_{p,R}(t=0) = 0,9986$. Можно считать, что обеспеченность нормативной величины временной нагрузки будет на порядок меньше – $P_{н,S}(t=0) = 0,999$. Логично предположить, что на последнем этапе эксплуатации обеспеченность будет еще меньше – $P_{н,S}(T) = 0,95$.

В соответствии с заданными значениями обеспеченности $P_n(t)$ на гистограммах суммарных усилий определяются усилия $S_{норм}(t=0)$ и $S_{норм}(T)$. Первое из них можно использовать для назначения величины нормативной автомобильной нагрузки при проектировании реконструкции старых мостов на срок до 30 лет, второе – при проектировании новых мостов.

Для примера на рис. 2 приводится график функции распределения изгибающе-

го момента в надпорном сечении между пролетами 84 и 63 м при соотношениях $k_1:k_2 = 1:1$, $C:T:A = 65:31:4\%$, условных схемах 2011 г. На этом графике показано значение момента в кНм, соответствующее обеспеченности $P=0,999$.

Результаты

Полученные нормативные усилия сопоставляются с соответствующими усилиями от действующей нормативной автомобильной нагрузки. Отношение этих величин представляет собой поправочный коэффициент k . Таким образом, было обосновано повышение класса нагрузки АК с $K=11$ до $K=14$.

Для проектирования мостов во Вьетнаме Нгуен Вьет Фьонг предлагает ввести поправочные коэффициенты к воздействиям на мосты нагрузки НЛ-93, которые оказались меньше единицы.

Возвращаясь к началу статьи, еще раз заметим, что не считаем приемлемым предложение о переходе на нагрузки Еврокодов. Однако в отдельных проектах, осуществляемых с привлечением зарубежных фирм по нормам проектирования, принятым в Европе, целесообразно использовать поправочные коэффициенты, как это предусмотрено в форме так называемых «национальных приложений» к Еврокодам.

Следует отметить также, что изложенную выше методику, особенно построение распределения вероятностей усилий, можно использовать при оценке долговечности элементов по признаку усталости.

А.И. Васильев, д-р техн. наук, профессор (МАДИ, Институт ИМИДИС)
Нгуен Вьет Фьонг, аспирант (МАДИ)